

## 資料8

## 博士論文審査報告

(論文題目) 生体信号による動作分類とリハビリテーションへの応用

(申請者) 中谷 真太郎

## 1. 論文内容の要旨

病気などで運動指令を伝える神経伝達回路が障害される、事故などで動かす器官が切断などで失われる、加齢などで筋力が低下するなど、人間が脳内で生じた運動意図を実現できなくなる場合がある。こうした機能不全の状態から運動機能を回復させようとする取り組みは、リハビリテーションと呼ばれる。これまで、工学的な観点からこれらのリハビリテーションを補助する装置が数多く開発されてきた。本論文では、特に生体信号が持つ問題点として、SN 比が低い信号の分類、信号特性が変化する場合の分類、複数のパターンの分類を挙げ、それぞれの問題を含んだシステムの開発に向けた研究を行った。

第1章においては、運動のリハビリテーションの現状と工学的な課題について述べた。先に述べたようにリハビリテーションには、機能回復、機能代償、機能低下の予防の3つの方向性がある。それぞれの方向性において工学が果たしている役割と、本研究で扱う問題との関連について示した。

第2章では、生体信号を用いた機械システムを製作する上での一般的な流れを紹介した。はじめに各種脳機能計測手法と筋活動の計測手法について述べた。

第3章では、SN 比が低い信号の分類問題として運動麻痺からの機能回復を目的とする、患者の脳活動を利用したリハビリテーションシステムの開発を行った。このシステムは、患者の運動企図に合わせて麻痺肢を強制的に動作させることによって中枢神経回路の活性化を促し、運動機能の回復につなげようとするものである。本論文では、対麻痺で両足が動かない患者を対象とし、自転車エルゴメータを漕ごうとする運動企図に合わせて強制動作を行わせるシステムを製作した。運動企図を読み取るために頭皮上脳波を利用することとし、頭皮上に設置した複数の電極から得られた頭皮上脳波から特徴的な変化を抽出した。また、このとき脳内の血流動態変化を計測できるとされる NIRS による計測を行い、健常者と患者の計測結果に類似性が見られることを示した。しかし通常のパターン認識手法では信号の SN 比が悪く望ましい識別結果を得ることができないため、既存の線形識別モデルの出力を自己回帰することで時空間平滑化機能を付加した識別器を新たに提案した。また、識別器の出力にシュミット・トリガ型の2段階しきい値を設定することで、脊髄損傷によって下肢麻痺を生じた患者の足こぎ動作企図の有無をおよそ 80%の精度で分類することができた。

第4章では、信号特性が変化する場合の分類問題として、上肢切断者のための高度な筋

電義手の実用性を高める手法について検討した。表面筋電義手を実現する際、体表に張り付けた電極から得られる筋電位のパターンから動作分類を行うことができる。しかし、体表に張り付けた電極の位置がわずかに変化するだけで信号特性が変化し、識別性能が劣化してしまう。特性が変化するたびに使用者は再学習を強いられるため、実用上の負担が大きい。そこで、筋電信号の多少の特性変動が生じて、使用者に負担をかけずに識別器の再学習を自動で行う半教師付き学習による手法を提案した。はじめに本論文では、提案した手法が実現可能であることを示すため、上腕部の2か所から得られた筋電信号を用いて手首の屈曲、伸展、回内、回外の4パターンを識別する問題に適用した。電極位置を意図的に変化させ、電極位置が2cm程度変化するだけで識別結果が10%以上低下するおそれがあることを示した。次に、あらかじめ学習に用いた動作データと計測データの関連から計測データの識別を行い、得られた識別結果に応じて線形識別器の更新を行うことで、電極位置のずれから生じた信号の特性変化によって悪化した動作識別性能を改善できることを確認した。

第5章では、少数の信号からの複数パターンの分類として予防的なりハビリテーションとして嚥下リハビリテーションを目的とした舌動作の分類問題について述べた。この時、義歯に各種センサを埋め込むことを想定し、筋電センサを義歯内に搭載した場合に得られるデータについて考察を行った。特に、舌運動によって発生する筋電位が歯ぐき上から計測できることを示し、計測データが摂食動作や飲水動作の検知に利用できる可能性を示した。加えて口腔内の筋電位から確率的分類器を用いて舌の動きを5つに分類し、動作識別が可能であることを示した。

第6章では、本論文で扱った運動リハビリテーション装置について総括し、これらのシステムにおいて利用した動作分類手法が工学的に有用であることを示した。

## 2. 論文審査結果の要旨

本論文では、生体信号の分類において生じる各種問題に対応した手法を提案し、実際のシステムの実現に向けた検討を行っている。

まず、SN比が悪い問題に対してノイズ除去機能を付加した識別器を提案し、脳波(EEG: electroencephalography)からの下肢運動麻痺患者の動作企图状態判別に適用している。麻痺患者の動作企图時の脳波は、健常者の実際の動作時に比べると変化が小さいため、従来以上にノイズに頑健な動作/動作企图の識別法を検討する必要がある。そこで、線形判別器の出力に過去の出力の情報を加える新たな識別器のモデルを提案し、実際の脳波による有効性の確認を行っている。また、動作の切り替え方向ごとに異なるしきい値を設定することで、ノイズの影響を低減させる手法を提案している。これらの結果をもとに下肢麻痺患者の脳活動の変化をリアルタイムに検出し、検出結果を用いて試作したペダル式電動リハビリシステムを動作させ、目的とするシステムの開発に成功している。

次に、信号の特性そのものが変化する場合に対して半教師付き学習を用いた識別器の自

動再学習法を提案し、電極位置が微小に変化した場合にも分類性能を維持できる表面筋電位(EMG: electromyography)からの動作分類に利用している。上腕部の2か所から得られた筋電信号を用いて手首の屈曲、伸展、回内、回外の4パターンを識別する際、電極位置を意図的に変化させ、電極位置が2cm程度変化するだけで分類率が低下するおそれがあることを示している。ここで提案法を用いることで識別器の更新を自動的に行うことが可能となることを示し、計測位置が多少変動した場合でも性能低下を抑えることができている。

加えて、多クラス分類問題の応用として、嚥下リハビリテーションを目的とした舌動作の計測と分類を行っている。歯科用マウスピース上(歯茎上)の5点に銀球電極を設置し、それらの電極の差動電位を記録することで口腔内における舌動作の計測が可能であることを示している。さらに、飲水動作時において複数点で口腔内筋電位の変化をとらえ、舌の動作を担っている筋群の動きを時系列的に解析している。加えて上記の信号を用いて舌の4動作(突き出し、引っ込め、左頬への押しつけ、右頬への押しつけ)を分類できることを確認し、入力インタフェースや見守りシステムとして利用できる可能性を示している。

以上の成果は、生体信号の工学的応用のみならず、ノイズを多く含む信号や特性が変化する信号を利用する際の有効な手段となり得る。本研究内容に関する公表状況は、学術論文5報(筆頭著者4報、内2報は英文)、国際会議発表3報(筆頭著者2報)であり、研究活動は活発であり、国内外での評価も高い。

よって本論文は博士(工学)の学位論文として価値のあるものと認める。また、平成28年1月19日、論文内容およびそれに関連する事項について試問を行った結果、合格と判定した。

平成28年 2月17日

主査	小西 康夫	印
副査	浅見 敏彦	印
副査	松井 伸之	印
副査	佐藤 孝雄	印